X Congreso Chileno de Ciencias Forestales

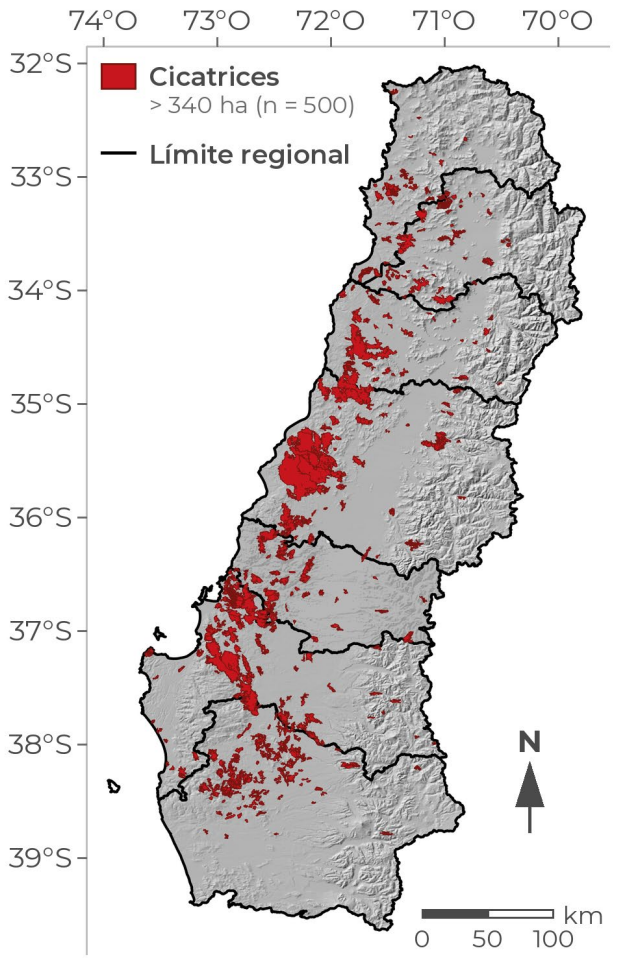
Estructura y composición del paisaje como controladores de la severidad de incendios forestales en Chile

Un enfoque basado en deep learning

Felipe Lepín[1] · Alejandro Miranda[1 3] · Sophia Barria[1] · Ernesto Castillo[2] · Danniela Espinoza[2] · Jaime Hernández[2] · Adison Altamirano[3]

[1] Lab. de Observación de la Tierra y Ecología de Bosques, Temuco · [2] Lab. de Geomática y Ecología del Paisaje, Universidad de Chile · [3] Lab. de Ecología del Paisaje y la Conservación (LEPCON), Universidad de La Frontera, Temuco

MESA 2 · GESTIÓN DEL RIESGO Y ADAPTACIÓN ANTE AMENAZAS FORESTALES EMERGENTES



Antecedentes

MapBiomas Fuego Chile: cartografía anual de área quemada

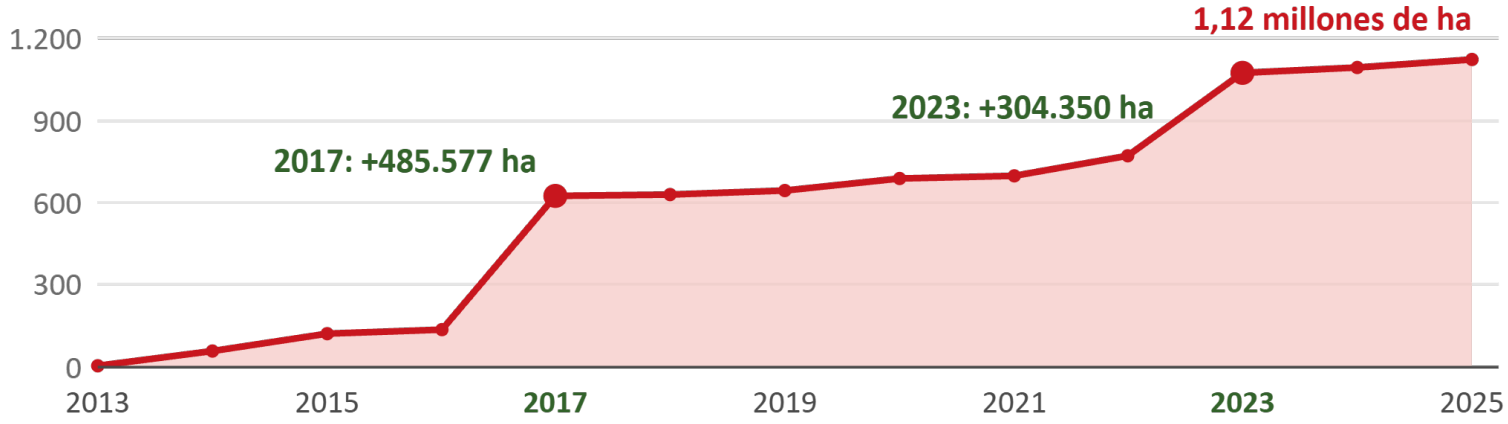
13 años
2013–2025

7 regiones
Valparaíso a La Araucanía

30 m
Landsat

~80 %
Jaccard vs. Miranda et al. (2022)

Superficie quemada acumulada de los 500 incendios analizados (miles de ha)



La cartografía identifica *dónde* ocurrió el fuego; este estudio analiza la severidad *al interior* de las cicatrices.

Índice de Jaccard: coincidencia entre dos mapas (0 = ninguna; 1 = total).

No solo dónde se quema, sino cómo





Baja severidad

· Fuego superficial; el dosel sobrevive en parte

· Suelo protegido

· Recuperación rápida

Alta severidad

· Copa consumida y alta mortalidad

· Suelo expuesto: riesgo de erosión

· Recuperación lenta

1. **Un mismo incendio no quema igual**
   dentro de una cicatriz coexisten sectores de alta y de baja severidad.

2. **La severidad define el impacto**
   mortalidad del arbolado, erosión del suelo y capacidad de recuperación del ecosistema.

3. **El monitoreo se ha centrado en dónde se quema**
   pero sabemos poco de qué configuraciones del paisaje favorecen o atenúan la severidad.

¿Qué paisajes favorecen o atenúan la severidad dentro de un incendio?

Severidad: magnitud del cambio en la vegetación y el suelo producido por el fuego. Fotografías: incendio de China Muerta, Región de La Araucanía (2015).

Objetivo

Identificar las condiciones del paisaje previo asociadas a la ocurrencia de alta y baja severidad al interior de grandes incendios.

1 ¿Qué atributos de cobertura, vigor del dosel, topografía y contexto espacial caracterizan a los sectores de alta y de baja severidad?

2 ¿Por qué, dentro de un mismo incendio, sectores con cobertura y vigor similares presentan severidades contrastantes?

◆ **Alcance:** el análisis se restringe a superficie quemada; no evalúa la probabilidad de ocurrencia del fuego.

Severidad: magnitud del cambio en la vegetación y el suelo producido por el fuego, estimada aquí con imágenes satelitales.

Flujo de trabajo

1 Cicatrices
MapBiomas Fuego Chile, 2013–2025

2 Selección
500 incendios de mayor tamaño (> 340 ha)

3 Variables previas
Cobertura, vigor, topografía y severidad

4 Ventanas
32 × 32 píxeles Landsat (~75 ha)

ANÁLISIS A · PREDICTIVO

Red neuronal convolucional

¿El paisaje previo permite discriminar alta de baja severidad?

48.419 ventanas · 430 incendios

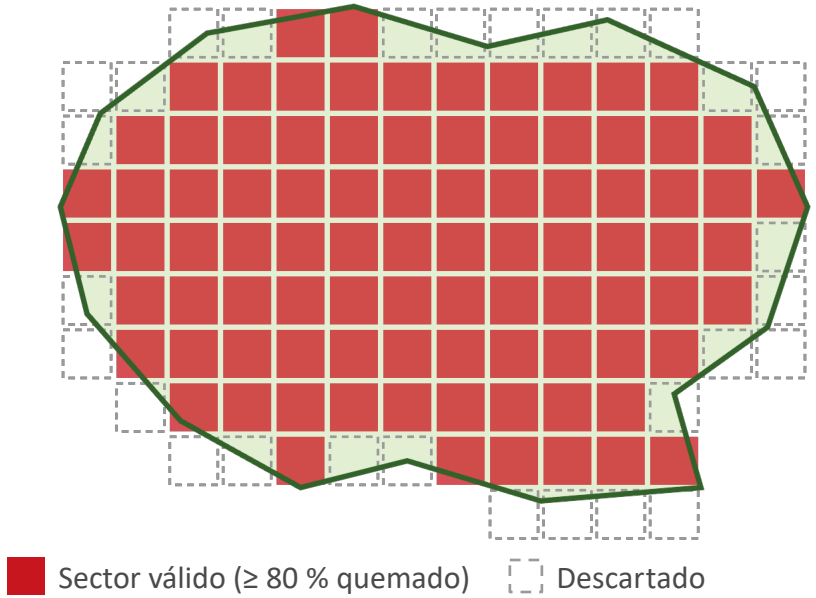
ANÁLISIS B · DESCRIPTIVO

Caracterización de sectores

¿Qué condiciones acompañan a cada clase de severidad?

10.426 sectores ≥ 80 % quemados · 398 incendios

Datos y unidad de análisis



Sector: 32 × 32 píxeles (~75 ha)

10.426 sectores en incendios > 340 ha

Cobertura previa

MapBiomas Chile, Colección 2 · año anterior al incendio

Vigor del dosel

NDVI Landsat · año anterior al incendio

Topografía

FABDEM 30 m · pendiente, exposición y posición en la ladera

Contexto espacial

Distancia al perímetro y cobertura de sectores vecinos

NDVI: índice de verdor de la vegetación (valores altos = dosel vigoroso). **dNBR:** diferencia de reflectancia antes y después del fuego; a mayor valor, mayor severidad.

¿Cómo medimos la severidad?

Landsat antes
año previo al incendio

→

Landsat después
temporada posterior

→

NBR = (NIR − SWIR2) / (NIR + SWIR2)

dNBR = NBR antes − NBR después

Vegetación sana: refleja mucho infrarrojo cercano (NIR) y poco infrarrojo de onda corta (SWIR) → NBR alto.

Después del fuego: cae el NIR y sube el SWIR → NBR bajo. Cuanto mayor el dNBR, mayor la severidad.

Clases de dNBR por píxel

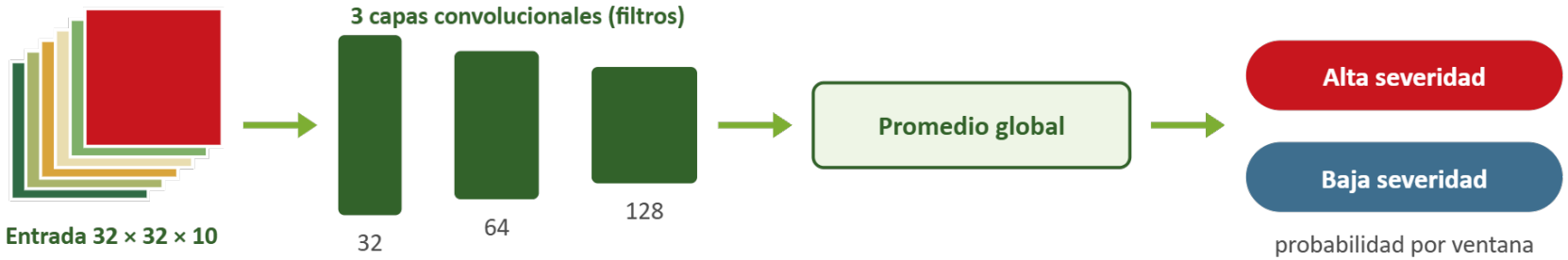
Sin cambio	Baja	Moderada	Alta
< 0,10	0,10–0,27	0,27–0,66	≥ 0,66

Sector de alta severidad ≥ 25 % de sus píxeles en clase alta

Sector de baja severidad ≥ 25 % de sus píxeles en clase baja

Umbrales de dNBR: Key y Benson (2006). Los sectores que no cumplen ninguno de los dos criterios se consideran de severidad intermedia.

Análisis A · Red neuronal convolucional



Validación por incendio completo

70 % de los incendios para entrenar y 30 % (130) para validar; ningún incendio en ambos grupos

Entradas del modelo	AUC
Solo cobertura · pruebas iniciales (resumen)	0,58–0,61
Cobertura + NDVI + pendiente	0,83

8 de 10 **veces el modelo distingue un sector de alta de uno de baja severidad**

Solo con cobertura: ~6 de 10 · al azar: 5 de 10

AUC: 0,5 = azar; 1 = discriminación perfecta. Versiones con distinta etiqueta y muestra: no estrictamente comparables.

Análisis B · Caracterización de sectores

Tres comparaciones sobre los 10.426 sectores para explicar **qué condiciones** acompañan a cada clase de severidad.

1 Perfiles de los extremos

Comparamos la distribución de nueve variables (cobertura, vigor, relieve y contexto) entre sectores de alta y de baja severidad.

→ DIAPOSITIVA 11

2 Ocurrencia por tipo de sector

Calculamos la proporción de sectores con alta severidad según la cobertura dominante y el vigor del dosel (NDVI).

→ DIAPOSITIVAS 12 Y 13

3 Dentro del mismo incendio

En plantaciones de alto vigor, medimos la alta severidad solo en sus píxeles de plantación, según el porcentaje de bosque nativo del sector. Controles: distancia al borde y posición en la ladera.

→ DIAPOSITIVA 14

Modelo mixto con efecto aleatorio por incendio: a igual NDVI y dentro del mismo incendio, la plantación presenta +0,046 de RBR respecto del bosque nativo.

Variabilidad de la severidad en un incendio

Igual cobertura y vigor, severidad contrastante dentro de un mismo evento

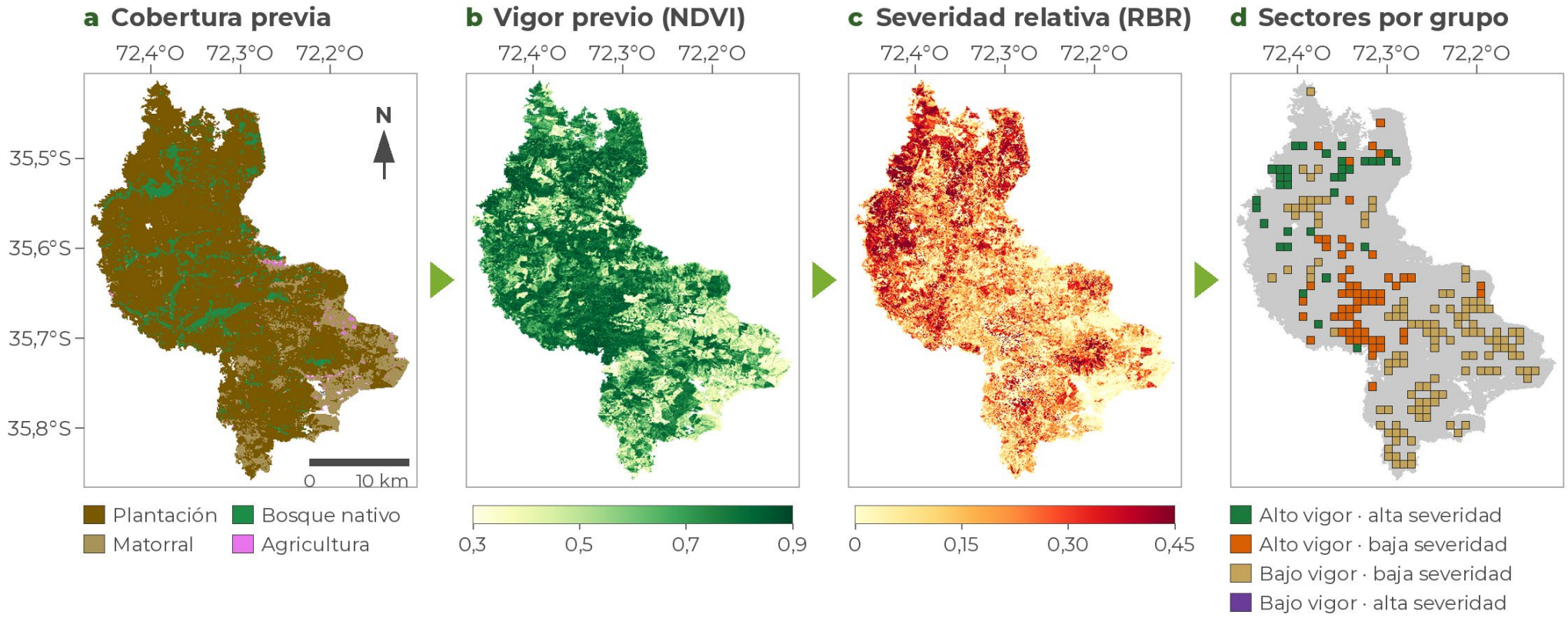
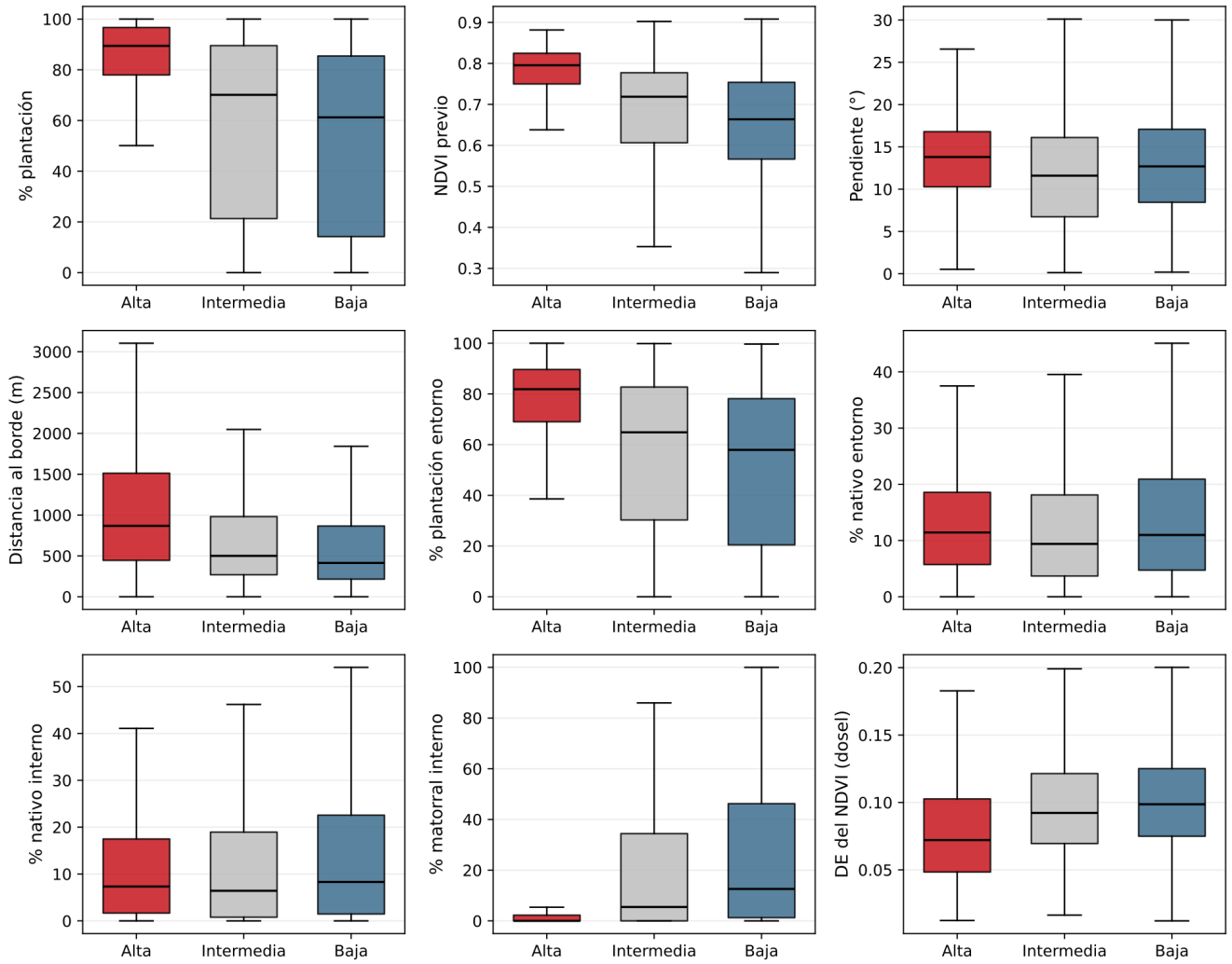


Figura 1. Incendio de 2017 (68.565 ha). a) Cobertura previa (MapBiomas Chile); b) NDVI previo; c) severidad relativa (RBR: dNBR ajustado por el verdor previo); d) clasificación de sectores.



Caracterización de los extremos

Alta severidad es principalmente:

· Plantación casi pura (89 %)

· Dosel muy verde y parejo (NDVI 0,80)

· Rodeada de plantación (82 %)

· Hacia el interior (~870 m del borde)

Baja severidad es principalmente:

· Más mezcla: plantación 61 %, matorral 13 %

· Dosel menos verde y más variable (0,66)

· Entorno más diverso (58 % plantación)

· Más cerca del borde (~410 m)

El relieve casi no cambia entre ambas.

Figura 2. Caja: 50 % central; línea: mediana.

Ocurrencia de alta severidad por tipo de sector

Matorral, uso agrícola o bajo vigor n = 3.202



0,5 %

≈ 1 de cada 200 sectores con alta severidad

Plantación de alto vigor (NDVI ≥ 0,79) n = 1.635



26 %

≈ 1 de cada 4 con alta severidad; 1 de cada 3 con baja

Alta severidad · Severidad intermedia · Baja severidad

La plantación de alto vigor es condición necesaria, pero no suficiente, para la alta severidad.

Alto vigor: plantaciones en el 25 % superior de NDVI (≥ 0,79). **Severidad intermedia:** sectores que no cumplen el criterio de alta ni de baja.

Vigor del dosel y tipo de cobertura

Cobertura dominante	Sectores con alta severidad (%)	NDVI (mediana)
Plantación	**12,2 %**	0,74
Bosque nativo	**7,5 %**	0,75
Matorral	**0,3 %**	0,51
Pastizal / agrícola	**0,0 %**	0,75

¿Por qué, si son igual de verdes? El NDVI mide verdor, no cuánta biomasa hay ni su altura.

Pastizal y cultivo

· Biomasa herbácea y baja, sin copas: el fuego pasa por la superficie

· Hay poco que perder y rebrotan rápido

· Con NDVI ≥ 0,7 (n = 203): ningún sector con alta severidad

Plantación

· Combustible leñoso continuo del suelo a la copa (hojarasca, ramas bajas)

· Permite fuegos de copa: hay mucho que perder

· A igual NDVI y en el mismo incendio, quema más que el bosque nativo

La severidad sigue a la biomasa leñosa continua, no al verdor por sí solo.

Severidad relativa (RBR): dNBR ajustado por el verdor previo, para comparar coberturas con distinta biomasa inicial.

Mezcla con bosque nativo

Píxeles de plantación con alta severidad (%), según el bosque nativo en el sector (%)

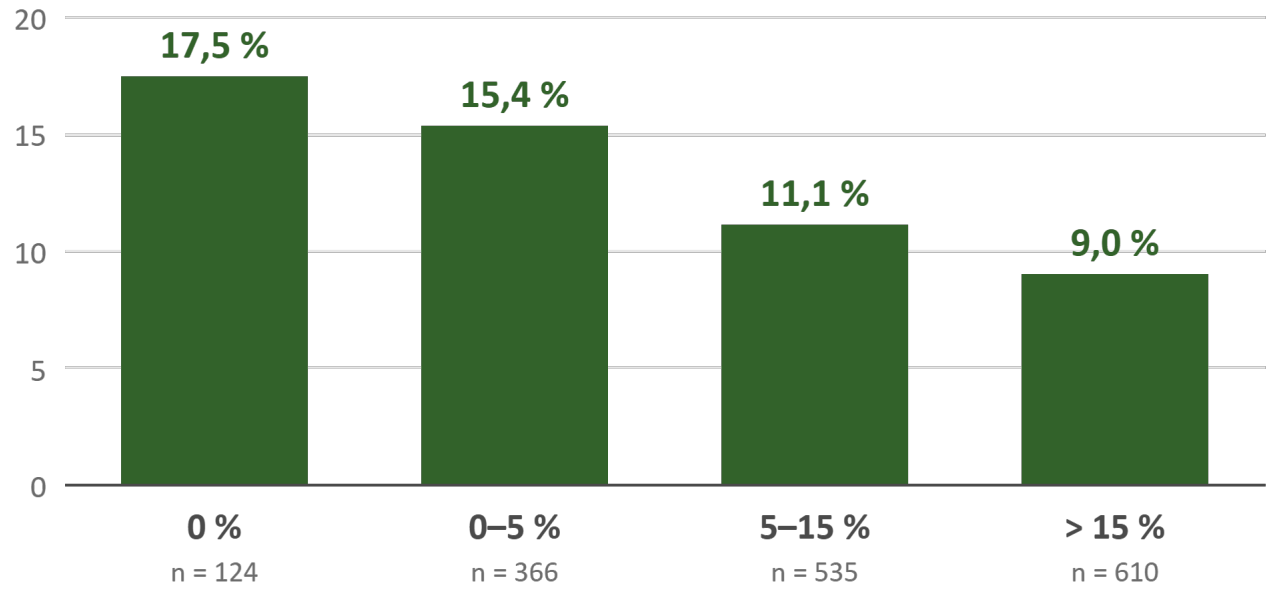


Figura 3. Sectores de plantación de alto vigor (NDVI ≥ 0,79), n = 1.635.

Más bosque nativo en el sector, menos alta severidad en la propia plantación.

Casi la mitad

17,5 % → 9,0 % de la plantación con alta severidad

Lejos del borde del incendio (> 300 m) se repite: 22,0 % → 10,7 %.

También en fondos de quebrada y en laderas.

Implicancias para la gestión del riesgo

El paisaje previo es una variable que el manejo forestal puede modificar.

1 Priorizar

Los rodales extensos y continuos de plantación de alto vigor concentran la alta severidad: son prioritarios para el manejo de combustibles y la discontinuidad del paisaje.

2 Diversificar

Conservar o restaurar remanentes de bosque nativo dentro y entre plantaciones podría moderar la severidad en el propio rodal.

3 Monitorear

MapBiomas Fuego y MapBiomas Cobertura permiten identificar estos paisajes antes del fuego y evaluar sus efectos después.

> **Cautela:** son asociaciones observadas; para orientar decisiones operativas falta incorporar la meteorología del día de quema y la edad y el manejo de los rodales.

CONCLUSIONES

1. La alta severidad se concentra en plantaciones de alto vigor y continuidad espacial; fuera de ellas es prácticamente inexistente.

2. La plantación de alto vigor es condición necesaria, pero no suficiente: solo el 26 % presentó alta severidad.

3. La presencia de bosque nativo en el sector se asocia con una reducción cercana al 50 % de la alta severidad en la propia plantación.

Gracias

felipe.lepin@ug.uchile.cl

UCM UNIVERSIDAD CATOLICA DEL MAULE

CSUCM Centro del Secano Universidad Católica del Maule

SOCIEDAD CHILENA DE CIENCIAS FORESTALES

OBIBO Laboratorio de Observación de la Tierra y Ecología de Bosques

gep Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje Universidad de Chile

MAPBIOMAS CHILE

Agradecimientos

A la iniciativa MapBiomas Chile y a la Fundación AVINA,

que hacen posible este estudio.

Al Laboratorio de Observación de la Tierra y Ecología de Bosques (OBiBO)

Universidad de La Frontera, Temuco

Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

Referencias

Arruda, V. L. S. et al. (2021). An alternative approach for mapping burn scars using Landsat imagery, Google Earth Engine, and deep learning in the Brazilian savanna. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100472.

Bowman, D. M. J. S. et al. (2019). Human–environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio*, 48, 350–362.

Hawker, L. et al. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17, 024016.

Key, C. H. y Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA): sampling and analysis methods. En *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. USDA Forest Service, RMRS-GTR-164-CD.

Klimas, K. B. et al. (2025). A machine learning model to predict wildfire burn severity for pre-fire risk assessments, Utah, USA. *Fire Ecology*, 21, 8.

Long, T. et al. (2019). 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat images and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(5), 489.

McCune, B. y Keon, D. (2002). Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of Vegetation Science*, 13, 603–606.

Referencias (continuación)

Miller, J. D. y Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66–80.

Miranda, A. et al. (2022). The Landscape Fire Scars Database: mapping historical burned area and fire severity in Chile. *Earth System Science Data*, 14, 3599–3613.

NLHPC (2024). Leftraru 2 supercomputing infrastructure (ECM-02). Centro de Modelamiento Matemático, Universidad de Chile. nlhpc.cl

Parks, S. A., Dillon, G. K. y Miller, C. (2014). A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing*, 6, 1827–1844.

Parks, S. A. et al. (2018). High-severity fire: evaluating its key drivers and mapping its probability across western US forests. *Environmental Research Letters*, 13, 044037.

Proyecto MapBiomas Chile – Colección 2 de la Serie Anual de Mapas de Cobertura y Uso del Suelo de Chile, consultada en octubre de 2026 a través del enlace: chile.mapbiomas.org

Proyecto MapBiomas Chile – Colección 2 de la Serie Anual de Mapas de Área Quemada (MapBiomas Fuego) de Chile, consultada en octubre de 2026 a través del enlace: chile.mapbiomas.org

X Congreso Chileno de Ciencias Forestales

Estructura y composición del paisaje como controladores de la severidad de incendios forestales en Chile

Un enfoque basado en deep learning

Felipe Lepín[1] · Alejandro Miranda[1 3] · Sophia Barria[1] · Ernesto Castillo[2] · Danniela Espinoza[2] · Jaime Hernández[2] · Adison Altamirano[3]

[1] Lab. de Observación de la Tierra y Ecología de Bosques, Temuco · [2] Lab. de Geomática y Ecología del Paisaje, Universidad de Chile · [3] Lab. de Ecología del Paisaje y la Conservación (LEPCON), Universidad de La Frontera, Temuco

MESA 2 · GESTIÓN DEL RIESGO Y ADAPTACIÓN ANTE AMENAZAS FORESTALES EMERGENTES